

5 Diskussion

5.1 Konzeption eines Segmentierungsalgorithmus

Die in Abschnitt 4.1. dargestellten Ergebnisse zeigen, dass eine Segmentierung von Alveolen durch Region Growing möglich ist. Es existieren zwar Abweichungen zwischen manuell und automatisch segmentiertem Volumen, diese bleiben jedoch in vertretbaren Grenzen, wenn beachtet wird, dass die Segmentierung der Fläche aufgrund der Neigung des benutzten Algorithmus zum Auslaufen nicht vollständig erfolgt ist, dargestellt ist dies in Abbildung 4.1. Das größte Problem eines einfachen Region Growing-Algorithmus ist folglich dessen Eigenschaft in benachbarte Strukturen auszulaufen. Obwohl Alveole 1 in Tabelle 4.1 eine signifikante Volumenabweichung zwischen manueller und automatischer Segmentierung zeigt, kann der benutzte Algorithmus dennoch als korrekt arbeitend betrachtet werden, schließt man die graphische Darstellung in Abbildung 4.1 ins Ergebnis ein. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass ein großer Teil der Abweichung zwischen den Segmentierungen auf mangelhafte Segmentierung in der Fläche zurückzuführen ist. Die Form der Alveole wird allerdings ausreichend exakt erfasst. Eine bessere automatische Segmentierung könnte durch Vergrößerung des Thresholds erreicht werden, allerdings nimmt dann die Wahrscheinlichkeit des Auslaufens der Segmentierung zu. Ist das Auslaufen des Algorithmus beherrschbar, so kann durch eine Anpassung des Thresholds die Abweichung zwischen automatischer und manueller Segmentierung verringert werden.

Signifikante Unterschiede in der Qualität der Segmentierung besonders in größerer Tiefe sind beim Vergleich von luftgefüllten und flüssigkeitsgefüllten Lungen zu erkennen; die Signalqualität in großer Tiefe ist bei flüssigkeitsgefüllten Lungen wesentlich besser. Grund dafür ist die Anpassung des Brechungsindex des in den Alveolen vorkommenden Mediums an den Brechungsindex von Wasser, der ungefähr dem von Weichteilgewebe entspricht. Für die konkrete Segmentierungsaufgabe bedeutet das, dass in flüssigkeitsgefüllten Lungen eine vollständige Erfassung von alveolaren Strukturen besser möglich ist.

Entscheidend für den Erfolg der Segmentierung, sowohl in luft- als auch in flüssigkeitsgefüllten Alveolen, ist die Prävention des Auslaufens des Algorithmus. Selbst im 2D-Fall reicht für einen Region Growing-Algorithmus eine Lücke in der Alveolarwand von einem Pixel Breite um ein Hineinlaufen in benachbarte Strukturen zu bewirken. Ein Auslaufen des Region Growings führt in jedem Fall zu einer gänzlich inkorrekten und damit unbrauchbaren Segmentierung. Für die Qualität eines Segmentierungsalgorithmus dieser Art ist, neben anderen Parametern, die Erkennung von Lücken in Alveolarwänden und deren Korrektur von größter Wichtigkeit.

5.2 Auslaufen des Algorithmus

Region Growing-Algorithmen können durch Lücken in der Begrenzung der zu segmentierenden Fläche auslaufen und benachbarte Strukturen in die Segmentierung einbeziehen. Um dies zu verhindern, muss entweder sichergestellt werden, dass die zu segmentierenden Bilddaten keine solchen Lücken enthalten oder es müssen entsprechende Maßnahmen zur Begrenzung der Ausbreitung des Algorithmus getroffen werden. In der vorliegenden Arbeit wurde der letztgenannte Ansatz gewählt.

5.2.1 Morphologischer Bilddatenvergleich

Zum einen kann das Auslaufen eines Region Growing-Algorithms durch kleine Lücken effektiv durch die in Kapitel 3.4.1. beschriebene morphologische Bildabfrage, d. h. durch Einbezug lokaler Informationen in das Segmentierungskriterium, verhindert werden.

Das segmentierte Volumen der Alveole wird durch die morphologische Abfrage nur wenig beeinflusst, da die Abfrage nur dann die Segmentierung limitiert, wenn sowohl in der ersten und in der letzten Zeile bzw. Spalte Bildelemente mit Grauwerten größer als der Threshold enthalten sind. Sind entweder in der ersten oder in der letzten Matrixzeile oder -spalte solche Bildelemente enthalten, tritt das zusätzliche Segmentierungskriterium nicht in Kraft. Es ist dem Algorithmus also weiterhin möglich, unmittelbar an die Wand einer Alveole zu segmentieren. Nur beim Auftreten von komplex geformten Wandverläufen könnte die morphologische Abfrage die Segmentierung beeinflussen, obwohl an der betreffenden Stelle keine Lücke in der Wand vorliegt. Der daraus resultierende systematische Fehler ist folglich auf wenige Bildelemente pro Alveole begrenzt.

5.2.2 Rekonstruktion von Alveolarwänden (Lasso-Algorithmus)

Um größere Lücken in Alveolarwänden zu überbrücken, wurde eine Rekonstruktion der Wand durch Liniengeometrie implementiert. Dieser Algorithmus ermöglicht die Segmentierung von Alveolen mit großen Lücken in den Alveolarwänden sowie mit geringem Signalanteil in großen Tiefen im Gewebe. Durch Nutzung dieses Algorithmus, der zwangsweise das Setzen eines Seeds erfordert, kann den charakteristischen Einschränkungen der OCT-Bilddaten effektiv begegnet werden. So ist eine vertretbar genaue Segmentierung auch in großer Tiefe von im Gewebe noch möglich. Nachteilig wirkt sich aus, dass nur Alveolen mit näherungsweise elliptischem Querschnitt effektiv verarbeitet werden können; komplex geformte Alveolen z. B. mit Hinterschneidungen, erfordern häufig ein mehrfaches Setzen des Seeds um die volle Querschnittsfläche zu

erfassen. In der Regel sollte der Benutzer diese Fälle erkennen können und durch Setzen mehrerer Seeds dennoch eine adäquate Segmentierung erreichen, beim Großteil der Alveolen sollte dies jedoch nicht nötig sein.

Erforderlich für ein erfolgreiches Ablaufen des Lasso-Algorithmus ist die Aussparung der Ausreißer. Eine Eliminierung dieser durch statistische Kriterien war wenig erfolgversprechend, aber die Verbindung von Kantenelementen anhand ihres Abstands zueinander führt zu einer zufriedenstellenden Rekonstruktion der Alveolarwände. Linienzüge, die durch Ausreißer generiert werden, können innerhalb oder außerhalb der eigentlichen rekonstruierten Alveolarwand verlaufen. Durch eine morphologische Bildverarbeitung, bei der anhand der Anzahl von benachbarten Pixel über die Segmentierung eines Bildelements entschieden wird, können davon resultierende Segmentierungsausfälle problemlos kompensiert werden. Außerhalb der zu segmentierenden Alveole verlaufende Linienzüge, die den Region Growing-Algorithmus ohnehin nicht beeinflussen könnten, sind nicht von Interesse.

5.3 Automatische Wahl des Thresholds nach Otsu

Wie in Kapitel 4.4. aufgezeigt, liefert der Algorithmus nach Otsu in vielen Fällen keinen passenden, sondern einen kleineren Threshold. Dies bewirkt eine signifikante Untersegmentierung, bei der nur ein Bruchteil des eigentlichen alveolaren Volumens segmentiert wird. Besonders deutlich wird dies bei den Alveolen 3 bis 5 in Abb. 4.8. Bei Bilddaten mit stark ausgeprägten Alveolarwänden wird ein annähernd korrekter Threshold berechnet. Dennoch erkennt man auch hier eine leichte Untersegmentierung gegenüber der Segmentierung mit manuell gewähltem Threshold.

Der Grund für die signifikanten Abweichungen des Otsu-Algorithmus sind in der Natur des Algorithmus selbst zu suchen. Dieser versucht die zur Verfügung stehenden Bilddaten in zwei etwa gleichstarke Klassen einzuteilen [19]. Besonders bei mittlerer Platzierung des Seeds in Alveolen mit wenig stark ausgeprägter Alveolarwand müssen die beiden entstehenden Klassen bei idealer Segmentierung jedoch eine erhebliche Differenz in der Anzahl der zugehörigen Elemente aufweisen. Die Einteilung in zwei gleichstarke Klassen wird in diesem Fall einen Teil der eigentlich zum alveolaren Volumen gehörenden Bildelemente in die Klasse der zur Alveolarwand gehörenden Klasse einteilen. Daraus folgt, dass der Threshold kleiner gewählt wird als er eigentlich sein müsste für eine ideale Segmentierung. Damit lässt sich auch erklären, dass der Otsu-Algorithmus bei Alveolen mit stark ausgeprägter Alveolarwand einen annähernd korrekten Threshold berechnen kann, hier entspricht die Anzahl der Bildelemente in der Klasse der alveolaren Wände ungefähr der Anzahl der Bildelemente des alveolaren Volumens. Dieses Verhalten passt

zu der von Sezgin und Sankur [19] beschriebenen Eigenschaft des Otsu-Algorithmus, dass dieser nur bei näherungsweise gleichstarken Klassen einen passenden Threshold berechnen kann.

Von der Benutzung des Otsu-Algorithmus im bestehenden Segmentierungsalgorithmus wurde abgesehen, da nur für eine bestimmte Klasse von OCT-Bilddaten ein hinreichend korrekter Threshold berechnet werden kann. Bei einer nicht unerheblichen Anzahl von Segmentierungen wird die Threshold-Berechnung nach Otsu ein nicht nutzbares Ergebnis liefern, dass eine manuelle Wahl des Thresholds erforderlich macht.

5.4 2,5D–Segmentierung zur Volumenbestimmung

Meißner, Knels et al. [14] stellen einen sigmoidalen Hysteresezusammenhang zwischen pulmonalem Druck und Alveolenvolumen fest, d. h. für gleiche Druckverhältnisse ist das alveolare Volumen im absteigenden Ast größer als im aufsteigenden Ast. Die in Abschnitt 4.5 dargestellten Ergebnisse liefern ein vergleichbares, diese Annahme bestätigendes Ergebnis. Betrachtet man die gemittelten Messwerte bei einem pulmonalen Druck von 5 und 10 mbar, so erkennt man eine deutliche Abweichung zwischen absteigenden und aufsteigenden Ast, die Werte für den absteigenden Ast sind größer. Mit steigendem Druck, bei 15 und 20 mbar, verkleinert sich der Abstand der berechneten Volumina im aufsteigenden und absteigenden Ast. Dies spricht für einen sigmoidalen Druck-Volumen-Zusammenhang der Alveolen.

Hysteresis ist die Eigenschaft eines Systems, pfadabhängige Zustände einnehmen zu können. Für den Fall der Alveolen würde das konkret bedeuten, dass während der Druckerhöhung in den Alveolen, z. B. bei künstlicher Inspiration, das Alveolenvolumen zunimmt und anschließend während der Druckverringerung nicht wieder auf das Ausgangsvolumen sinkt, sondern einen Zustand mit leicht vergrößertem Volumen einnimmt, selbst wenn der pulmonale Druck den Ausgangsdruck erreicht.

Die Nutzung eines 2,5D-Algorithmus, also der Zusammensetzung von dreidimensionalen aus niederdimensionalen Daten bringt für die Segmentierung Vorteile. Bei Nutzung eines echten 3D-Algorithmus wäre die Beherrschung des Auslaufverhalten deutlich schwieriger zu erreichen. Beim vorliegenden Algorithmus muss der Benutzer zwar für jede zu segmentierende Ebene einen Seed definieren, für Segmentierungen in flüssigkeitsgefüllten Alveolen wäre jedoch eine automatische Übertragung des Seeds in andere Ebenen und darauf aufbauend eine komplette Segmentierung einer Alveole denkbar. Bei luftgefüllten Alveolen ist diese Vorgehensweise aufgrund des starken Signalabfalls mit zunehmender Eindringtiefe nicht empfehlenswert.

5.5 Einflussgrößen und Fehleranalyse

Da der Benutzer aufgrund des halbautomatischen Algorithmienablaufs Einfluss auf die Parameter Threshold und Seedposition hat, müssen eventuell daraus entstehende Fehler überprüft werden. Bei der Auswertung der Ergebnisse zeigt sich, dass der numerische Wert des Thresholds einen entscheidenden Einfluss auf den Betrag des segmentierten Volumens hat, dagegen hat die Position des Seeds bei hinreichender Rotationssymmetrie der Alveole so gut wie keinen Einfluss auf das Segmentierungsergebnis.

Bei einer Messreihe beträgt die Standardabweichung des Thresholds 22,5 % des Mittelwertes der Messreihe, im Gegensatz dazu zeigt die Seedposition eine verschwindend geringe Standardabweichung von 1,1 %. Von größter Wichtigkeit ist demnach die adequate Wahl des Thresholds, da eine Veränderung dieses Parameters eine signifikante Veränderung des segmentierten Volumens nach sich zieht.

Der Threshold selbst ist wiederum ein vom Bildkontrast und von der Grauwertverteilung der Bilddaten abhängiger Parameter, folglich haben Schwankungen dieser Bildcharakteristika einen ähnlichen Einfluss auf das segmentierte Volumen wie eine Schwankung des Thresholds. Der Threshold wird schließlich anhand der Helligkeits- und Kontrastwerte der vorliegenden Bilddaten gewählt. Aufgrund seines großen Einflusses auf das Segmentierungsergebnis sollte der Threshold, sofern ersichtlich ist, dass die verarbeiteten Bilddaten ausreichend homogen bezüglich der Helligkeit sind, für alle OCT-Volumenstapel einer Messreihe als konstanter Wert vorgegeben werden. Nur so lassen sich größere Ungenauigkeiten der Segmentierung ausschließen. Wenn möglich, sollte ein Algorithmus zur automatischen Wahl des Thresholds genutzt werden. Zwar existiert eine Reihe solcher Verfahren [19], aufgrund des begrenzten Zeitumfangs dieser Arbeit wurde jedoch nur der Algorithmus nach Otsu implementiert und bewertet, der sich jedoch als wenig brauchbar erwies und deshalb nicht benutzt werden kann. Allerdings sind auch ohne eine Möglichkeit der automatischen Thresholdberechnung mit der beschriebenen Methodik aussagekräftige Segmentierungsergebnisse zu erzielen. Ein alternativer Ansatz zur Berechnung des Thresholds kann sich dem aus Abb. 4.12 dargestellten Intervall mit geringem und linearem Volumenanstieg über dem Threshold ergeben, dass von zwei Bereichen mit wesentlich größerem Anstieg eingerahmt wird. Der optimale Threshold im genannten Beispiel könnte durch Detektion des beschriebenen Intervalls gefunden werden. Der optimale Threshold könnte in der Mitte des Bereiches des linearen Anstiegs der in Abb. 4.12 dargestellten diskreten Funktion liegen.

Die in den Algorithmus eingebrachten Ungenauigkeiten aufgrund der Position des Seeds sind als unkritisch einzustufen, da ihr Einfluss auf das Segmentierungsergebnis mehr als eine Größenordnung geringer ist als der Einfluss der Thresholdwahl. Allerdings sollte darauf geachtet

werden, dass ein problemloses Setzen des Seeds beim Lasso-Algorithmus nur bei näherungsweise elliptischen Alveolen möglich ist. Alveolen mit Hinterschneidungen erfordern entweder eine exakt mittige Positionierung des Seeds um die Hinterschneidungen zu erfassen, oder das Setzen mehrerer Seeds. Dabei wird jeweils ein Teilvolumen einer Alveole durch einen Algorithmusablauf segmentiert. Das eventuell nicht segmentierte Teilvolumen kann durch setzen eines Seeds in den betreffenden Bereich der Alveole in einem zweiten Durchgang segmentiert werden. In diesem Falle ist die Qualität der Segmentierung stärker von der Positionierung der Seeds abhängig und sollte vom Benutzer entsprechend sorgfältig durchgeführt werden. Für die Mehrzahl aller Alveolen sollte dieser Umstand jedoch keine Rolle spielen.